

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КАМЕРЕ ДОЖИГАНИЯ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ С ДВИГАТЕЛЕМ НК-37

© 2007 Д. Ю. Бантиков, В. Н. Лавров, А. М. Постников

ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, Самара

В данной статье представлены результаты численного моделирования процессов смешения и горения смеси газов в камере дожигания блока дожигающего устройства, разработанного для парогазовой установки. Описаны особенности конечно-элементной модели элемента системы стабилизации. Приведены и проанализированы уровни температур, полноты сгорания и эмиссии оксидов азота для различных режимов работы.

Для сокращения времени конструкторских разработок и уменьшения материальных затрат на испытания и доводку камер сгорания находят все большее применение пакеты программ, предназначенные для определения параметров и характера процессов горения, протекающих в двигателе.

Таким образом, конструктор получает возможность перед изготовлением и испытанием деталей и узлов провести исследование математических моделей этих узлов, получая результаты с большой вероятностью достоверности. Это позволяет увеличить число рассматриваемых вариантов конструкции для выбора наиболее оптимального, уменьшить число натурных испытаний, а значит сократить время и уменьшить стоимость изготовления и доводки узлов.

В данной работе представлены результаты численного моделирования процессов смешения и горения смеси газов в камере дожигания (КД) блока дожигающего устройства (БДУ), разрабатываемого для парогазовой установки. При проведении расчетов ставились задачи оптимизации конструкции системы стабилизации горения, системы подвода топлива и оценки величины эмиссии оксидов азота и полноты сгорания на выходе из КД.

Для выполнения данных задач разработан набор моделей системы стабилизации, различающихся размерами и конструкцией стабилизаторов, числом ячеек сетки и заложеными моделями образования оксида азота. На основании анализа результатов расчета созданных моделей определена оптималь-

ная система стабилизации процесса горения и подводов топлива.

На базе выбранной оптимальной конструкции системы стабилизации горения и подвода топлива создана окончательная конечно-элементная модель камеры дожигания, состоящая из двух частей и обеспечивающая достаточную точность вычислений при приемлемом времени расчета.

Первая часть представляет собой симметричный сектор проточной части камеры дожигания, включающий в себя половину горизонтального стабилизатора с восемью форсунками, центральный цельный радиальный стабилизатор и трубку подачи топлива на радиальный стабилизатор с восемью форсунками (рис. 1). Длина зоны горения за стабилизатором ограничена одним метром. Вторая часть модели представляет собой прямоугольник длиной девять метров, имитирующий область за стабилизаторами первой части, в которой происходит процесс догорания и перемешивания потоков газа.

Сетка моделей комбинированная (рис. 2). На входе в первую модель и в отверстиях подвода топлива (метана) задается граничное условие массового расхода рабочего тела с равномерным профилем скорости. На выходе из модели задается постоянное по сечению статическое давление. По бокам модели указывается условие симметрии сектора в составе системы стабилизации. К поверхностям, определяющим объемы твердых тел модели, применяется условие “прилипания” потока.

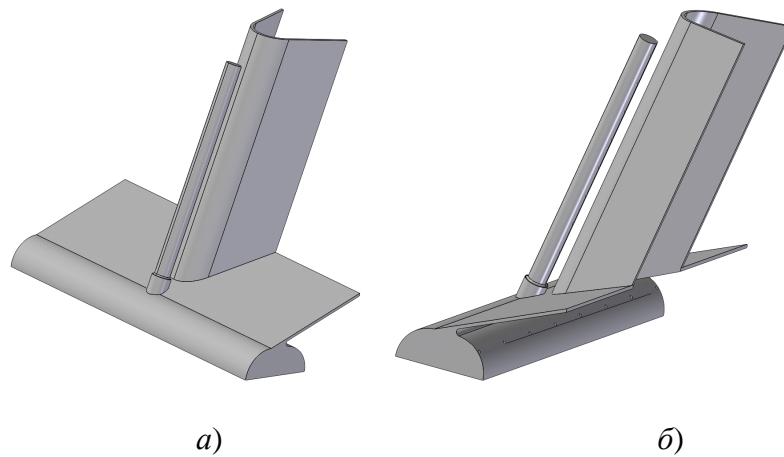


Рис. 1. Стабилизатор пламени камеры дожигания: а – вид по потоку; б – вид против потока

На входе во вторую модель задается граничное условие скоростного входа. При этом задаются поля скоростей, температур и составляющих смеси, полученные в выходном сечении первой части модели и перенесенные во вторую часть модели через промежуточный файл.

Модель системы стабилизации пламени рассчитывалась в статической постановке задачи с применением двухпараметрической стандартной модели турбулентности $k-\epsilon$.

При моделировании процесса горения считалось, что наблюдается горение чистого метана в затурбинных газах ГТУ в пределах

модели конечных объемов/распада вихря *Finite-Rate/Eddy-Dissipation*, представляющей собой моделирование уравнений переноса, описывающих конвекцию, диффузию и источники членов каждого компонента смеси.

При расчете величины образования оксидов азота NO_x использовались модели образования “термических” NO (образуются вблизи поверхности стехиометрии в зоне высоких температур) и “быстрых” NO (образуются в первичной зоне сгорания через реакции N_2 с углеводородными радикалами), образование NO из топлива и через реакции

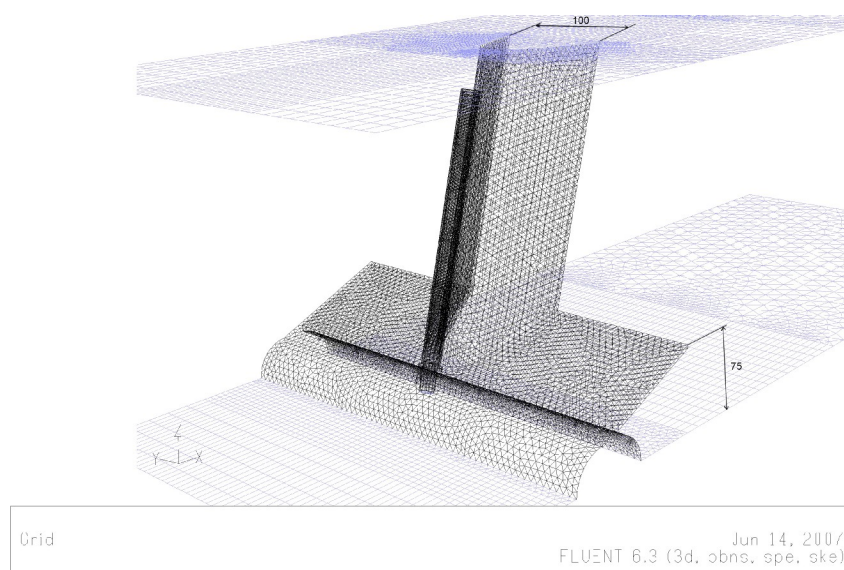


Рис. 2. Сетка ячеек расчетной модели стабилизатора

с N_2O . При расчете также применялся механизм уменьшения концентрации NO (“дожигания NO ”).

Результаты расчетов первой модели на максимальном режиме работы ($t_H = -30$ °С, $N = 100$ %) представлены на рисунках 3...5.

На рисунке 3 даны линии тока, демонстрирующие обтекание вертикального уголка. Рисунки 4 и 5 демонстрируют распределение температуры газа и массовой концентрации оксидов азота за вертикальным уголком. Как показывают расчеты, картина течений и процессов смешения и горения топлива на других режимах работы камеры дожи-

гания качественно не отличается от картины, рассчитанной для максимального режима и приведенной на рисунках 3...5.

На рис. 6 представлен процесс смешивания горячего и холодного газа во второй части модели.

В результате проведенных расчетов были определены параметры рабочего процесса в КД. Расчет значений проводился методом осреднения величин по массе в выходном сечении модели. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Проведенные расчеты созданной математической модели позволили не проводя

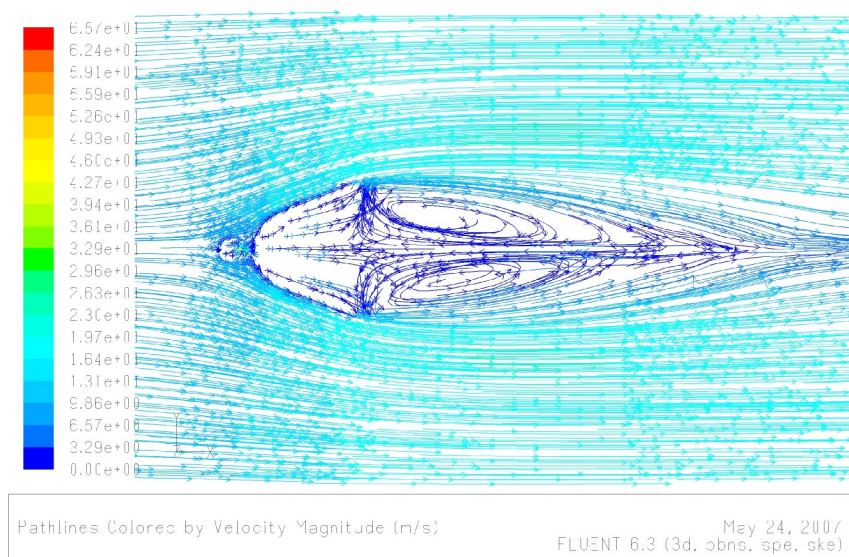


Рис. 3. Течение в плоскости вертикального уголка

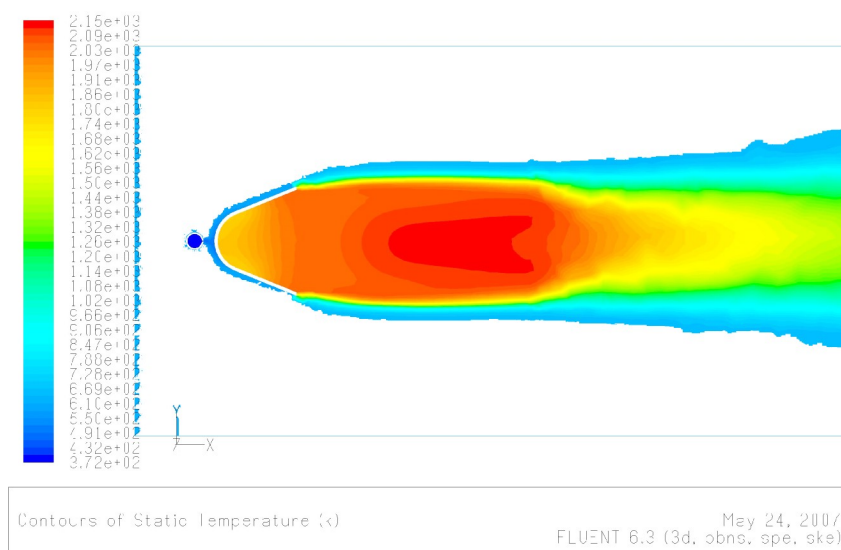


Рис. 4. Линии постоянной температуры за вертикальным уголком

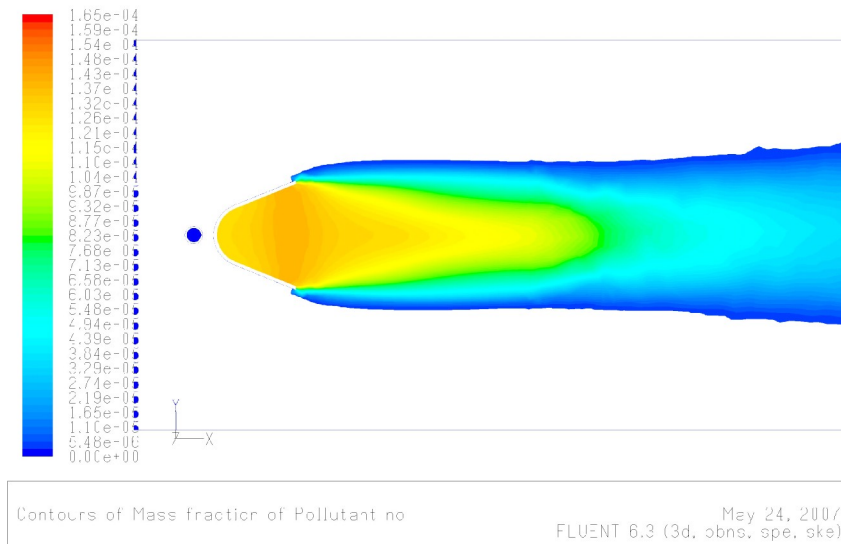


Рис. 5. Линии постоянной массовой концентрации оксидов азота за вертикальным уголком (кг/кг)

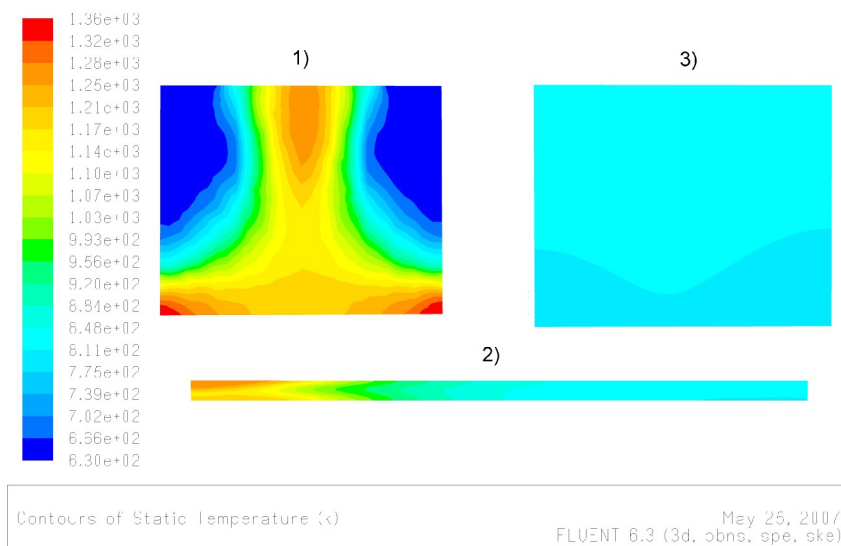


Рис. 6. Линии постоянной температуры в продольной плоскости X-Z (2) и в плоскостях Y-Z на входе (1) и на выходе (3) из КД

экспериментальных исследований выбрать близкую к оптимальной компоновку камеры дожигания и оценить ее основные характеристики. На основании проведенных расчетов для выбранной конструкции можно ожидать, что:

1. Фронтное устройство с выбранными размерами стабилизаторов обеспечивает температурное поле с неравномерностью 20 °С.

2. Величина полноты сгорания топлива составляет 99,9 % и сохраняется постоянной по режимам работы установки.

3. Величина прироста эмиссии оксидов азота NO_x при изменении режима работы БДУ мало меняется и составляет около 12 ppm.

4. При увеличении коэффициента избытка топлива a наблюдается уменьшение области горения, снижение температуры на выходе из камеры дожигания, снижение полноты сгорания топлива и уменьшение величины выбросов оксидов азота. Увеличение температуры затурбинных газов приводит к увеличению температуры на выходе из камеры дожигания и росту величины выбросов

Таблица 1. Рассчитанные параметры на выходе из БДУ

t_H	°C	-30		+30	
N	%	50	100	50	100
$T_{\text{вых сред.}}$	К	797,44	813,97	839,90	817,73
$d_{T \text{ теор}}$	%	-0,57	-2,65	-2,07	0,64
$C_{\text{CH}_4 \text{ } 10\text{м}}$	%	0,0415	0,0374	0,0275	0,0638
$C_{\text{O}_2 \text{ } 10\text{м}}$	%	14,946	15,238	15,711	16,274
$h_{\text{БДУ}}$	%	99,959	99,963	99,973	99,936
$W_{\text{вых сред.}}$	м/с	9,1352	11,795	10,195	9,6194
C_{NO_x}	мг/кг	8,3572	8,8114	11,567	9,7341
C_{NO_x}	мг/нм ³	17,322	18,231	23,846	19,989
C_{NO_x}	ppm	8,4340	8,8755	11,610	9,7320

оксидов азота. Совместное влияние этих факторов приводит к тому, что при изменении режима работы величина выбросов оксидов азота остается примерно на одном уровне.

5. Основной вклад в образование оксидов азота вносят “термический” и “быстрый” механизмы образования NO . Величина образования NO из топлива и через реакции с N_2O и уменьшения концентрации NO вследствие реакции с продуктами сгорания (“дожигания” NO) незначительна.

6. Было определено, что основной механизм образования оксидов азота – “термический”. Поэтому величина массовой концентрации NO растет по мере удаления от стабилизатора, что объясняется ростом температур. Так как наблюдается распространение огневого факела за пределы первой модели, то на режимах работы установки с высокими расходами топлива величина концентрации NO будет заниженной.

7. Величина температуры на выходе из камеры дожигания возрастает по высоте модели. Это связано с высокими температурами за радиальным стабилизатором и его наклоном по потоку газа.

8. Аэродинамика течения во фронтальном устройстве показывает, что имеется развитие обратных токов в следе за стабилизаторами, соответствующих теоретическим данным и в плоскости симметрии поперечного стабилизатора существует вихрь, направленный вдоль стабилизатора. Оба фактора способствуют хорошей стабилизации пламени и надежному пламяперебросу от дежурной

зоны фронтального устройства к основным стабилизаторам.

На основании анализа разработанной модели системы стабилизации можно сделать следующие заключения:

9. Результаты расчетов, полученные в случае применения плоских моделей, могут носить только ориентировочный характер, так как плоская модель не позволяет достоверно смоделировать процесс подачи топлива из форсунки.

10. Характер получаемой картины обтекания стабилизаторов (форма и число обратных токов) зависит от размеров, числа и распределения элементов. Слишком большой размер элемента в данной модели может привести к сильному осреднению параметров потока и разрушению вихря. Поэтому размер элемента следует выбирать в 10...20 раз меньше характерного размера вихря. Число элементов по длине модели определяет характер представлений о смешении потоков. Большой размер элементов в данной модели приводит к “затягиванию” процесса смешивания и горения.

11. Форма и число зон обратных токов в модели, а также их расположение в пространстве зависят от формы и размеров трехмерной модели. Наиболее общую картину течения дает совместная модель радиального и горизонтального стабилизаторов.

В заключение следует отметить, что точность получаемых результатов напрямую зависит от сложности применяемой модели и числа конечных ячеек. Точность результа-

тов может быть повышена при использовании единой модели, состоящей из нескольких цельных стабилизаторов и разбитой на мелкоэлементную сетку. В условиях ограниченности машинных ресурсов хорошие результаты обеспечивает разбиение модели на отдельные части, связанные данными в промежуточных файлах.

Список литературы

1. Ю. Г. Куценко. Численные методы оценки эмиссионных характеристик камер сгорания газотурбинных двигателей. - Екатеринбург-Пермь: УрО РАН, 2006. – 142 с.
2. Ф. Г. Тухбатуллин, Р. С. Кашапов. Малотоксичные горелочные устройства газотурбинных установок. – М.: ОАО Издательство “Недра”, 1997. – 155с.: ил.

NUMERICAL SIMULATION OF WORKING PROCESS IN AFTERBURNER CHAMBER OF VAPOUR GAS MACHINE WITH NK-37 ENGINE

© 2007 D. Y. Bantikov, V. N. Lavrov, A. M. Postnikov

JSC SNTK named by N.D. Kuznetsov

The results of the numerical modeling of the gases mixing and gases mixture combustion processes in the afterburning chamber of the afterburning module for the combined-cycle plant are presented in the article. The characteristic features of the finite-element model of the stabilization system element are described. The burning gases mixture temperature levels, combustion efficiency and nitrogen oxides emission at different operating modes are given and analysed.